تقدیم به حضرت صدیقه طاهره فاطمة الزهرا (سلام الله علیها) اولین شهید گمنام راه ولایت،

و به همه شهدای گمنام که به مادرشان اقتدا کردند.

و تقدیم می گردد به شهدای هسته ای جمهوری اسلامی ایران

شهید علیمحمدی

شهید شهریاری

شهید رضایی نژاد

شهید احمدی روشن

با سپاس از خانواده ام و خانواده همسرم که صمیمانه مرا در این مدت، یاری کردند.

و با تشکر از همه کسانی که در انجام این کار، مرا راهنمایی کردند.

چکیده

دستگاه تصویربرداری برش نگاری با نشر پوزیترون(PET) یکی از قدرتمندترین ابزارهای علمی و بالینی در بررسی فرآیندهای بیوشیمی در بدن انسان است. با استفاده از این تکنیک، یک رادیوایزوتوپ کوتاه عمر گسیلنده پوزیترون، وارد بدن بیمار- معمولا در سیستم گردش خون- می شود. چهار رادیوایزوتوپ ^{13}N،^{11}C،^{18}F و ^{15}O به دلیل نیمه عمر کوتاه و جانشینی آسان با مولکول های زیستی، پرکاربردترین رادیوایزوتوپ های کوتاه عمر هستند. نیمه عمر یک رادیوایزوتوپ جهت توزیع منطقه ای، باید به اندازه کافی بلند باشد و از سوی دیگر برای به حداقل رساندن پرتوگیری بیمار، باید به طور مناسبی کوتاه باشد؛ این شرط به خوبی در مورد ^{18}F صدق می کند که رایج ترین رادیوایزوتوپ PET به شمار می رود.

یکی از روش های برتر تولید رادیوایزوتوپ های کوتاه عمر(SLR) مورد استفاده در PET، به دلیل سادگی، ارزانی و ساختار قابل حمل؛ روش تولید با دستگاه پلاسمای کانونی است. در سال های اخیر، پژوهشگران استفاده از پلاسمای کانونی برای تولید چند رادیوایزوتوپ کوتاه عمر را با بازده واکنش نسبتا بالا در هر شات، به اثبات رسانیده اند. تولید رادیوایزوتوپ با پرکردن محفظه دستگاه از مخلوط یک گاز با عدد اتمی پایین(LZ) و یک یا چند گاز با عدد اتمی بالاتر(HZ)، صورت می گیرد. بنابراین اگر محفظه دستگاه با گازLZ دوتریوم و ^{20}Ne به عنوان گاز HZ پر شود، ^{18}F از طریق واکنش $^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$ به دست خواهد آمد.

در این کار، ما به بررسی امکان تولید آزمایشگاهی رادیوایزوتوپ ^{18}F با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی IR-MPF-۱۰۰ (واقع در سازمان انرژی اتمی ایران) پرداختیم که محفظه دستگاه، باید با گاز دوتریوم و درصدهای مختلف گاز ^{20}Ne پر می شد. سپس با استفاده از محاسبات عددی، تعداد رادیوایزوتوپ های^{18}Fتولید شده در هر شات و اکتیویته آن ها را برای درصدهای مختلف از گاز نئون(حداکثر تا ۱۵ درصد) شبیه- سازی کردیم.

فهرست مطالب

فصل۱. مقدمه ۱

۱-۱. واکنش هسته ای ۱

۱-۱-۲. سطح مقطع واکنش ۱

۱-۱-۳. واکنش شکافت هسته ای ۲

۱-۱-٤. واکنش گداخت هسته ای ۳

۱-۲. اندرکنش های ذرات باردار با ماده ٤

۱-۲-۱. قدرت متوقف کنندگی ٦

۱-۲-۲. واپاشی بتا ۷

۱-۳. پزشکی هسته ای ۹

۱-۳-۱. رادیو ایزوتوپ ۹

۱-۳-۲. رادیو دارو ۱۲

۱-۳-۳. روش های تصویر برداری در پزشکی هسته ای ۱٤

۱-۳-٤. مضرات استفاده از PET، SPECT و به ویژه دستگاه های ترکیبی CT ۲۱

۱-۴. آشکارسازهای هسته ای ۲۲

۱-٤-۱. انواع آشکارسازهای هسته ای ۲۲

فصل۲. روش های تولید رادیو ایزوتوپ ها ۲۷

۲-۱. تولید رادیوایزوتوپ در راکتور تحقیقاتی ۲۷

۲-۱-۱. انواع راکتورهای تحقیقاتی ۲۸

۲-۱-۲. راکتور تحقیقاتی تهران ۲۹

۲-۱-۳. ویژگی های ماده هدف ۳۰

۲-۱-٤. واکنش های هسته ای ۳۱

۲-۱-۵. معادله اکتیویته و تصحیح آن ۳۲

۲-۱-٦. نمونه ای از رادیو داروهای تولید شده در راکتور و کاربرد آن ها در پزشکی ۳۵

۲-۲. تولید رادیوایزوتوپ با استفاده از سیکلوترون ۳۸

۲-۲-۱. ساز و کار و اجزای سازنده سیکلوترون ۳۸

۲-۳. رادیو ایزوتوپ های تولید شده در سیکلوترون ٤۲

۲-۳-۱. کربن- ۱۱ ..... ٤۲

۲-۳-۲. نیتروژن-۱۳ ..... ٤۳

۲-۳-۳. اکسیژن-۱۵ ..... ٤٣

۲-۳-٤. ید-۱۲٤ ..... ٤٣

۲-۳-۵. استرانسیوم-۸۲ ..... ٤٣

۲-۳-٦. تکنسیم-۹٤m ٤٤

۲-۴. تولید رادیو ایزوتوپ توسط لیناک ٤٤

۲-٤-۱. اجزای سازنده شتاب دهنده خطی ٤٤

۲-۵. مزیت سیکلوترون بر راکتور ٤٧

فصل۳. دستگاه پلاسمای کانونی و فرآیند تولید نوترون ۴۸

۳-۱. معرفی دستگاه پلاسمای کانونی ٤٨

۳-۱-۱ ساز و کار کلی دستگاه PF ۵۰

۳-۲. کاربردهای دستگاه پلاسمای کانونی ۵۰

۳-۳. رفتار دینامیکی پلاسمای کانونی ۵۱

۳-۳-۱. مرحله شکست گاز و تشکیل لایه جریان ۵۱

۳-۳-۲. مرحله حرکت محوری لایه جریان ۵۲

۳-۳-۳. مرحله حرکت شعاعی لایه جریان ۵٤

۳-۴. تولید نوترون ۵۷

۳-٤-۱. آشکارسازی نوترون های تولید شده در پلاسمای کانونی ۵۹

۳-٤-۲. ساز و کارهای تولید نوترون در پلاسمای کانونی ۵۹

۳-٤-۳. ناهمسانگردی نوترون ها ٦٤

۳-۵. گسیل پرتوهای مختلف در پلاسمای کانونی ٦٦

۳-۶. حفاظت در برابر پرتوهای دستگاه پلاسما کانونی ٦٨

فصل۴. روش های تولید رادیوایزوتوپ ^{18}F و سنتز رادیوداروهای PET ۷۰

۴-۱. رادیوایزوتوپ های کوتاه عمر(SLR ها) ۷۰

٤-۱-۱. SLR های مورد استفاده در PET ۷۰

۴-۲. فلوئور-۱۸ ..... ۷۱

٤-۲-۱. واکنش های تولید رادیوایزوتوپ ^{18}F ۷۱

۴-۳. واپاشی بتا توسط ^{18}F ۷٤

۴-۴. روش های تولید ^{18}F ۷۵

٤-٤-۱. تولید ^{18}F در راکتور ۷۵

٤-٤-۲. تولید ^{18}F در شتاب دهنده سیکلوترون ۷٦

٤-٤-٢-١.معایب روش های موجود و نیاز به روش های جدید جهت تولید SLRهایPET ٧٧

۴-۵. سنتز ترکیبات ^{18}F ۷۸

٤-٥-١. جانشینی های هسته دوست چربی دار ۷۹

٤-٥-٢. جانشینی هسته دوست آروماتیک ۷۹

٤-٥-٣. واکنش های الکترون دوست ۷۹

۴-۶. چند نمونه از رادیوداروهای حاوی ^{18}F ۸۰

٤-٦-١. فلوئورو دِ اُکسی گلوکز (FDG۱۸) ۸۰

٤-٦-٢. فلوئوروتیاهِپتادِکانوئیک اسیدFTHA [۱۸F] ۸۱

٤-٦-٣. سدیوم فلوئورید($Na^{18}F$) ۸۲

٤-٦-٤. فلوئورو دوپا- ^{18}F ۸۳

فصل۵. تولید رادیوایزوتوپ ^{18}F در دستگاه پلاسمای کانونی..... ۸۶

۵-۱. تولید SLRها در دستگاه PF ۸۶

۵-۲. محاسبه اکتیویته رادیوایزوتوپ تولید شده با استفاده از دستگاه پلاسما کانونی..... ۸۷

۵-۲-۱. تولید ^{18}F**1** با استفاده از پروتون ۹۲

۵-۲-۲. تولید ^{18}F **از طریق واکنش های** $^{16}O(^{3}He,p)^{18}F$ **و** $^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$ ۹۳

۵-۲-۳. تولید F۱۸ بدون تزریق گاز دوتریوم ۹۵

۵-۳. بررسی تغییرات با وجود گاز افزودنی ۹۶

۵-۴. محاسبه اکتیویته ^{18}F با استفاده از دستگاه پلاسما کانونی IR-MPF-۱۰۰ ..... ۹۹

۵-۴-۱. مشخصات دستگاه پلاسما کانونی IR-MPF-۱۰۰..... ۹۹

۵-۴-۲. محاسبه بازده واکنش $^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$ در دستگاه *IR-MPF*-۱۰۰..... ۱۰۴

نتیجه گیری ۱۱۶

پیشنهادات..... ۱۱۷

فهرست منابع ۱۱۸

فصل۱.مقدمه

۱-۱. واکنش هسته ای

وقتی هدف های عناصر پایدار در معرض تابش پرتو خارجی یا پرتو داخلی ذرات شتاب دار قرار گیرند، ذرات با هسته هدف واکنش می دهند و واکنش های هسته ای رخ می دهد. یک واکنش هسته ای ساده ، اندرکنش پروتون p با عنصر هدف ${}^{A}_{Z}X$، را به صورت زیر نمایش می دهیم:

$$ {}^{A}_{Z}X\ (p,n)\ {}^{A}_{Z+1}Y \qquad (۱-۱) $$

که n نوترون گسیلی و ${}^{A}_{Z+1}Y$ رادیو نوکلئید تولیدی است[۱] .

به عنوان مثال؛ اگر هسته ${}^{20}Ne$ با یک پرتو دوترونی جهت تولید یک هسته ${}^{18}F$ به همراه یک ذره آلفا، بمباران شود، این واکنش به شکل ${}^{20}Ne(d,\alpha){}^{18}F$ خلاصه نویسی می شود.

وقتی هسته مرکب متلاشی می شود، انرژی جنبشی همه محصولات، ممکن است بیشتر یا کمتر از انرژی جنبشی کل همه ی واکنش دهنده ها باشد. اگر انرژی محصولات، بیشتر باشد به این واکنش، گرماده گفته می شود و اگر انرژی جنبشی محصولات، کمتر از واکنش دهنده ها باشد به این واکنش، گرماگیر گفته می شود [۲].

۱-۱-۲. سطح مقطع واکنش

سطح مقطع واکنش، معیاری از احتمال رخ دادن یک واکنش خاص است. این کمیت، معیاری از مساحت است و برای هر واکنش هسته ای به صورت زیر نمایش داده می شود[۲] :

$$ \sigma_i = \sigma_{com}\left(\frac{P_i}{\sum P_j}\right) \qquad (۲-۱) $$

که در آن

σ_i : سطح مقطع محصول خاص i است.

σ_{com} : سطح مقطع تشکیل هسته مرکب است.

P_i : احتمال فرآیند i

$\sum P_j$: مجموع احتمال های همه فرآیندها

واحد سطح مقطع بارن است که ۱ barn= $۱۰^{-۲٤}\ cm^{۲}$ می باشد[۳].

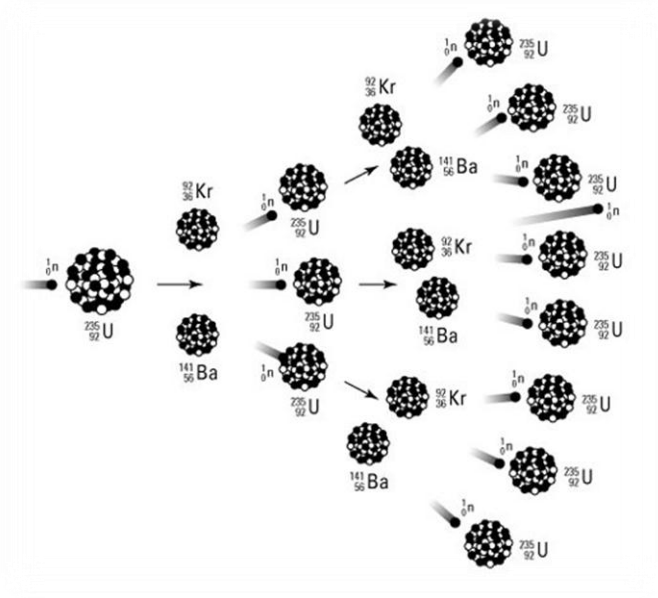
۱-۱-۳. واکنش شکافت هسته ای

در واکنش شکافت هسته ای، یک هسته سنگین به دو یا چند هسته کوچکتر شکافته می شود. مجموع جرم پاره های شکافت، کمتر از جرم اولیه است. این جرم طبق معادله انیشتین به انرژی تبدیل شده است [٤]. یکی از پدیده های قابل توجه در طبیعت، برخورد یک نوترون با هسته اورانیوم- ۲۳۵ و ناپایدار کردن آن، به سمت شکافت هسته ای است [۵].

در تجهیزات هسته ای، شکافت هسته ای با فرآیندهای بمباران نوترون- حاصل از برخورد دو ذره زیراتمی- رخ می دهد. در یک نیروگاه هسته ای، انرژی در اثر واکنش زیر تولید می شود:

$$^{۲۳۵}_{۹۲}U + ^{۱}_{۰}n \rightarrow \quad X + \quad Y + x\,n + E \qquad (۳-۱)$$

که در آن X و Y عناصر سبک تر از اورانیوم و x تعداد نوترون های گسیلی و E انرژی حاصل از شکافت است [٦].



شکل(۱-۱) واکنش زنجیره ای شکافت هسته ای $^{235}_{92}U$

انرژی آزاد شده در واکنش شکافت هسته ای در حدود ۲۰۰ میلیون الکترون ولت است، در حالی که اکثر سوخت های شیمیایی فقط چند الکترون ولت انرژی آزاد می کنند. انرژی شکافت هسته ای به صورت انرژی جنبشی پاره[۱]های شکافت، پرتو های گاما و میزان بسیار زیادی گرما، آزاد می شود [۷].
ایزوتوپ هایی که در واکنش زنجیره ای شکافت شرکت می کنند، سوخت هسته ای نام دارند. رایج ترین سوخت های هسته ای اورانیوم-۲۳۵ و پلوتونیوم-۲۳۰ هستند. این سوخت ها به عناصر شیمیایی با جرم های اتمی در محدوده ۱۳۵-۹۵ شکافته می شوند [۷].

۱-۱-٤. واکنش گداخت هسته ای

گداخت هسته ای واکنشی است که در آن دو یا چند هسته، جهت تشکیل عنصر جدید با عدد اتمی بالاتر ترکیب می شوند. گداخت دو هسته سبک می تواند انرژی ای به بزرگی شکافت ^{۲۳۵}U یا ^{۲۳۹}Pu آزاد کند [۸]. شناخته شده ترین واکنش هسته ای در طبیعت، واکنشی است که منشا انرژی تابشی خورشید به شمار می رود. یعنی گداخت چهار هسته هیدروژن و تشکیل یک هسته بزرگتر به شکل زیر:

[۱]) Fragment

$$۴\ {}_{1}^{1}H\ +۲\ {}_{-1}^{0}e \rightarrow {}_{2}^{4}He \qquad (۴-۱)$$

واکنش های دیگر گداخت هسته ای که دارای آهنگ واکنش بالا هستند، به شکل زیر است:

$${}_{1}^{2}D + {}_{1}^{2}D \rightarrow \begin{cases} {}_{2}^{3}He + {}_{0}^{1}n + ۳/۲۷\ MeV \\ {}_{1}^{3}T + {}_{1}^{1}H + ۴/۰۳MeV \end{cases} \qquad (۵-۱)$$

$${}_{1}^{2}D + {}_{1}^{3}T \rightarrow {}_{2}^{4}He + {}_{0}^{1}n + ۱۷/۶\ MeV \qquad (۶-۱)$$

لازم به ذکر است که هر دو واکنش D-D با احتمال یکسان صورت می گیرد و واکنشD-T دارای احتمال بیشتری نسبت به واکنش D-D است.

به منظور برخورد دو هسته جهت ایجاد واکنش گداخت هسته ای، باید انرژی جنبشی مربوط به سرعت نسبی دو پروتون، از پتانسیل نیروی کلمبی بیشتر باشد. در روشی برگرفته از خورشید، باید هسته ها را گرم کرد. به بیان دقیق تر، باید گاز به شکل پلاسما درآید و سپس دمای پلاسما افزایش یابد تا یک نرخ قابل قبول از گداخت به دست آید.

شرط لازم برای انجام واکنش های گداخت و ادامه یافتن آن، این است که پلاسما؛ دما و چگالی بالای خود را برای مدتی حفظ کند. به همین منظور، دمای پلاسما باید تا ۱۰keV(حدود $۱۰^{۸}\ ^{\circ}K$) افزایش یابد. دستیابی به این دما، اولین هدف است و هدف دوم آن است که پلاسما با دمای بالا در فضایی محدود و برای مدت زمان مناسب محصور شود.

دستگاه پلاسمای کانونی یکی از دستگاه های گداخت است که در آن محصورسازی به روش مغناطیسی انجام می گیرد [۶].

۱-۲. اندرکنش های ذرات باردار با ماده

زمانی که ذره باردار در میان محیط اطراف خود حرکت می کند، از طریق یونیزاسیون، پراکندگی و انواع گوناگون اتلاف های تابشی، اندرکنش می کند. چهار حالت اصلی برای اندرکنش وجود دارد:

در حالت اول، ذرات با الکترون های اتمی محیط اطراف، برخوردهای ناکشسان[۱] دارند. در این مورد، الکترون ها به تراز انرژی بالاتر(برانگیختگی) یا حالت غیرمقید(یونیزاسیون) می روند. اگر یونیزاسیون رخ دهد؛ یون ها و الکترون ها برای تشکیل یک اتم یا مولکول برانگیخته ی خنثی، بازترکیب می شوند. در هردو مورد، اتم یا مولکول برانگیخته، باید انرژی اضافی خود را به مولکول های اطراف منتقل کند.

در حالت دوم، ذرات با هسته های ماده هدف، برخورد ناکشسان می کند. در این مورد، ذره باردار مقداری- که وابسته به نزدیکی رویارویی است- منحرف شده و بارها گیر می افتند. در بعضی از این منحرف شدن ها، بسته[۲]ای از انرژی با تابش (ترمزی) از دست می رود و میزان متناسبی از انرژی جنبشی جفت برخوردی[۳]، تلف می شود. شدت تابش ترمزی کل با مجذور جرم ذره باردار، به طور معکوس تغییر می کند، بنابراین برای پروتون ها، معمولا مقداری قابل ملاحظه نیست.

در حالت سوم، ذرات با هسته های ماده هدف، برخوردهای کشسان می کنند. در یک برخورد کشسان، ذره فرودی منحرف می شود اما نه تابش می کند و نه منجر به برانگیختگی هسته هدف می شود. تنها اتلاف انرژی، ناشی از پایستگی اندازه حرکت در منحرف شدن ذره است. این فرآیند برای الکترون ها رایج است، اما برای ذرات باردار، احتمال خیلی کمتری دارد.

در حالت آخر، ذرات با الکترون های اتمی، برخورد کشسان می کنند. این فرآیند معمولا تنها در انرژی پایین رخ می دهد، زمانی که ذره باردار به الکترون اتمی- برای بالا بردن آن به پایین ترین تراز انرژی حالت برانگیخته- به میزان کافی انرژی منتقل نمی کند.

ذرات باردار، در نتیجه همه این چهار فرآیند- زمانی که در ماده هدف حرکت می کنند- انرژی از دست می دهند. در انرژی های نوعی برای تولید رادیوایزوتوپ، یک ذره -پیش از آن که ساکن شود- باید تحت بیش از یک میلیون برخورد قرار گیرد. البته نوع برخوردها و مسیر دقیق یک ذره منحصر بفرد، قابل پیش بینی نیست. اگرچه از آنجا که احتمال ها قابل محاسبه هستند و تعداد ذرات، زیاد است؛ رفتار کلی پرتو با دقت و اعتبار بالایی قابل پیش بینی است [۲].

[۱] (Inelastic

[۲] (Quantum

[۳] (Colliding pair

۱-۲-۱. قدرت متوقف کنندگی

کند شدن (از دست دادن انرژی جنبشی) ذره باردار، قدرت متوقف کنندگی نام دارد و با رابطه زیر تعریف می شود:

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \qquad (۷-۱)$$

که E انرژی ذره (MeV) و x فاصله طی شده است(cm).

محاسبه دقیق این کمیت، پیچیده است. اما از یک تقریب منطقی نسبتا ساده استفاده می شود:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{۴\pi z^۲ e^۴ NZ}{m_۰ V^۲ A} ln\left(\frac{۲m_۰V^۲}{I}\right) \qquad (۸-۱)$$

z : عدد اتمی ذره

Z : عدد اتمی ماده جذب کننده

e : بار الکترون

$m_۰$: جرم سکون الکترون (مگا الکترون ولت)

A : عدد جرمی ماده جذب کننده

V : سرعت ذره($\frac{cm}{s}$)

N : عدد آووگادرو

I : پتانسیل یونیزاسیون ماده جذب کننده(eV)

۱-۲-۲. واپاشی بتا

ذرات بتا، الکترون ها یا پوزیترون ها (الکترون هایی با بار الکتریکی مثبت یا پادالکترون ها) هستند. واپاشی β شامل یکی از سه فرایند زیر است:

- واپاشی نگاترون (β^-)
- واپاشی پوزیترون (β^+)
- گیر اندازی الکترون(EC[۱])

در هر سه فرآیند، بار هسته محصول به اندازه یک واحد، از هسته اصلی تفاوت داشته، ولی تغییری در عدد جرمی به وجود نمی آید [۹].

واپاشی بتا هنگامی رخ می دهد که در یک هسته با تعداد زیادی پروتون (ویا تعداد زیادی نوترون)، یکی از پروتون ها (ویا نوترون ها) به صورت های دیگر تغییر شکل می یابد [۳].

۱-۲-۲-۱. واپاشی نگاترون (β^-)

در واپاشی نگاترون یک ذره β^- (الکترون) به همراه یک آنتی نوترینو ساطع می شود و عدد اتمی یک واحد افزایش می یابد. به عبارت دیگر یک نوترون به یک پروتون، یک الکترون و یک آنتی نوترینو واپاشیده می شود [۳]:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \qquad (۹-۱)$$

فروپاشی β^- در هسته هایی که نوترون اضافی دارند، رخ می دهد. این واپاشی از هسته مادر با عدد اتمی کمتر به عدد اتمی بیشتر انجام می شود. از آنجا که محصولا ت اولیه شکافت دارای نوترون های اضافی نسبت به نسبت پایداری نوترون- پروتون هستند، با تبدیلات متوالی و واپاشی β^- به ایزو بار پایدار خود فروپاشی می کنند. به دلیل آن که بخشی از اختلاف انرژی هسته مادر(اولیه) و هسته دختر(محصول) توسط آنتی نوترینو

[۱]) Electron Capture

حمل می شود، انرژی β^- گسیل شده، از صفر تا مقدار بیشینه(برابر با اختلاف انرژی هسته مادر و دختر) تغییر می کند. به عبارتی، طیف انرژی β^- پیوسته است.

هنگامی که یک ذره بتا در نزدیکی هسته ای از مسیر خود منحرف می شود، تغییر سرعت آن باعث تولید تابش الکترومغناطیسی می شود که به اصطلاح به آن پرتو برمشترالانگ[۱] یا تابش ترمزی می گویند. این تابش مانند پرتو X بوده ولی تفاوت هایی با آن دارد. احتمال رخ دادن پدیده فوق، با افزایش عدد اتمی(Z) محیط بالا می رود. به همین دلیل لازم است جهت جذب انرژی بتا، از موادی با عدد اتمی پایین استفاده شود [۹].

۱-۲-۲-۲. واپاشی پوزیترون (β^+)

در واپاشی پوزیترون، یک ذره β^+ و یک نوترینو گسیل می شوند و عدد اتمی به اندازه یک واحد کاهش می یابد [۹]. به عبارت دیگر؛ یک پروتون به یک نوترون، یک پوزیترون و یک نوترینو واپاشی می شود [۳]:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \qquad (۱۰-۱)$$

حرکت بر روی جدول نوکلئیدها بر روی خط ایزوبار از بالا سمت چپ به سمت پایین سمت راست می باشد. این پدیده در هسته هایی با کمبود نوترون و یا دارای پروتون اضافه رخ می دهد.

انرژی β^+ مانند انرژی β^- ، بین صفر و اختلاف انرژی هسته مادر و دختر تغییر می کند. از آنجایی که به لحاظ جرمی یک نوترون معادل جرم یک الکترون و پروتون است، برای تبدیل نوترون و گسیل پوزیترون، باید اختلاف انرژی هسته های مادر و دختر به اندازه جرم دو الکترون(۱/۰۲MeV) باشد [۹].

۱-۲-۲-۳. گیر اندازی الکترون(EC)

در گیر اندازی الکترون، یکی از الکترون های لایه داخلی اوربیتال اتم توسط هسته گیر افتاده و ضمن تبدیل به یک پروتون وتبدیل آن پروتون به نوترون، یک پرتو نوترینو گسیل می شود. در این حالت مانند حالت واپاشی β^+ عدد اتمی هسته دختر(محصول) به اندازه یک واحد کاهش می یابد.

[۱]) **Bremsstrahlung**

به دلیل وجود الکترون در واکنش گیراندازی الکترون، ضرورتی برای اختلاف انرژی ۱/۰۲MeV بین هسته مادر و دختر نیست و معمولا این فرآیند برای حالتی که تفاوت انرژی بین هسته مادر و دختر، کمتر از ۱/۰۲MeV است، رخ می دهد.

فرایندهای واپاشی β^+ و گیراندازی الکترون، فرایندهای رقابتی هستند. به دلیل جاذبه بیشتر بین پروتون های هسته هایی با جرم اتمی بالا نسبت به الکترون ها، احتمال گیراندازی الکترون در هسته هایی با عدد اتمی بالا، بیشتر از گسیل پرتو β^+ است [۹].

۱-۳. پزشکی هسته ای

پزشکی هسته ای شاخه ای از علم پزشکی است که در آن از مواد رادیواکتیو برای تشخیص و درمان بیماری استفاده می شود. مواد رادیواکتیو مورد استفاده یا رادیو ایزوتوپ هستند و یا داروهایی که با مواد رادیو ایزوتوپ نشاندار شده اند.

مواد رادیواکتیوی که در پزشکی هسته ای مورد استفاده قرار می گیرند نیمه عمر خیلی کوتاهی دارند و خیلی زود از بین می روند.

۱-۳-۱. رادیو ایزوتوپ

بسیاری از عناصر شیمیایی دارای ایزوتوپ هستند. ایزوتوپ یک عنصر با خود عنصر دارای پروتون های برابری است (عدد اتمی برابر) اما تفاوتشان در تعداد نوترون هاست. در یک اتم ، در حالت طبیعی، تعداد الکترون های خارجی برابر عدد اتمی است. این الکترون ها در معادلات شیمیایی به کار می روند. عدد جرمی(جرم اتمی) مجموع پروتون ها و نوترون ها است. ۸۲ عنصر پایدار و ۲۷۵ ایزوتوپ پایدار مربوط به این عناصر نیز وجود دارد.

وقتی ترکیبی از نوترون ها و پروتون ها به وجود آید که قبلا در طبیعت وجود نداشته اند ، این محصول مصنوعی خواهد بود و غیر پایدار است و آن، ایزوتوپ رادیو اکتیو یا رادیوایزوتوپ نامیده می شود[۱۰, ۱۱] .

در حال حاضر بیش از ۲۰۰ رادیو ایزوتوپ مورد استفاده قرار می گیرند که اکثر آن ها به صورت مصنوعی تولید می شوند. هسته رادیو ایزوتوپ معمولا با گسیل یک ذره آلفا (یون هلیوم) و یا یک ذره بتا (پوزیترون ها یا الکترون های پر سرعت و پر انرژی) پایدار می شوند[۱۲] .

اکثر قریب به اتفاق رادیوایزوتوپ های پزشکی، در تشخیص های پزشکی استفاده می شوند و فقط بخش کوچکی از آن ها در پرتودرمانی برای درمان بیماری ها استفاده می شوند. به عنوان مثال تا کنون در تخریب تومورها یا در درمان درد در مراقبت های بهداشتی موقت بکار رفته اند[۱۲] .

در تولید رادیو ایزوتوپ، اتم های یک عنصر به اتم های عنصر دیگر تبدیل می شوند. این تبدیل شامل تغییر در تعداد پروتون ها و یا نوترون ها در هسته هدف می شود. اگر نوترونی بدون گسیل ذرات افزوده شود، آنگاه هسته تولید شده دارای خواص شیمیایی مشابه با هسته هدف خواهد بود. اما اگر هسته هدف با یک ذره باردار(مانند پروتون) بمباران شود، هسته تولید شده عنصر دیگری خواهد شد. انرژی بستگی نوکلئون ها درهسته به طور متوسط حدود ۸ MeV است. بنابراین اگر پرتابه ورودی، بیش از این مقدار انرژی داشته باشد این واکنش منجر به بیرون راندن ذرات دیگری از هسته هدف خواهد شد. با انتخاب دقیق هسته هدف، ذره بمباران کننده و انرژی آن، تولید یک رادیونوکلئید خاص ممکن می گردد[۲] . رادیو نوکلئید ها توسط روش های شیمیایی مناسبی از ماده هدف جدا می شوند[۱] .

۱-۳-۱-۱. معادله تولید رادیوایزوتوپ ها

میزان اکتیویته تولید شده در پرتو دهی ذرات باردار به ماده هدف، توسط رابطه زیر قابل اندازه گیری است:

$$A = I\, n\, \sigma \left(۱ - e^{-\lambda t}\right) \qquad (۱۱-۱)$$

A: اکتیویته واپاشی رادیو نوکلئید تولید شده در هر ثانیه

I: شدت ذرات پرتو افکنی شده ($\text{تعدادذرات}/\text{sec}.cm^{۲}$)

n : تعداد اتم های هدف

σ : سطح مقطع واکنش رادیوایزوتوپ که واحد آن بارن است.($۱\ barn = ۱۰^{-۲٤}\ cm^{۲}$)

λ :ثابت واپاشی رادیوایزوتوپ ($\lambda = \frac{۰/٦۹۳}{t_{۱/۲}}\ \ sec^{-۱}$)

t : زمان پرتو افکنی (ثانیه)

رابطه (۱-۱۱) نشان می دهد که میزان اکتیویته رادیو نوکلئید ها با زمان پرتو دهی، شدت ، انرژی ذرات (وابسته به σ) و مقدار ماده هدف افزایش می یابد.

عبارت $\left(۱ - e^{-\lambda t}\right)$ فاکتور اشباع[۱] نام دارد که وقتی t برابر با زمان ۵ تا ٦ نیمه عمر رادیو نوکلئید مورد نظر باشد، این فاکتور به عدد یک نزدیک می شود. در این لحظه بازده رادیو نوکلئید بیشینه است و سرعت تولید و واپاشی برابر می شود که نشان می دهد با پرتو دهی بیشتر، اکتیویته بیشتر نمی شود. در نتیجه رابطه (۱-۱۱) چنین می شود:

$$A = I\,N\,\sigma \qquad (۱۲-۱)$$

مقادیر I با روش های متنوعی اندازه گیری می شود مقدار σ برای واکنش های هسته ای مختلف تعین شده است. تعداد اتم های هدف با رابطه زیر بدست می آید:

$$N = \frac{W \times K}{A_W} \times ٦/٠٢ \times ١٠^{-٢٣} \qquad (۱۳-۱)$$

که w وزن هدف ، A_W وزن اتمی ، k فراوانی طبیعی عنصر هدف و $٦/٠٢ \times ١٠^{-٢٣}$ عدد آووگادرو است [۱] .

۱-۳-۱-۲. اکتیویته ویژه[۲]

اکتیویته ویژه؛ میزانی از تعداد اتم ها یا مولکول های رادیو اکتیو، درمقایسه با کل اتم ها یا مولکول های موجود در نمونه را نشان می دهد [۲]. اکتیویته ویژه یک نمونه ، به صورت رادیو اکتیویته در واحد جرم رادیونوکلئید تعریف می شود که برحسب واحد های $mci/_{\mathrm{mol}}$ $(MBq/_{\mathrm{mol}})$ یا $mci/_{\mu\mathrm{mol}}$ $(MBq/_{\mu\mathrm{mol}})$ بیان می شود[۱] . اگر تمام اتم های موجود در نمونه، رادیو نوکلئید باشند، نمونه به عنوان

[۱] Saturation Factor

[۲] Specific Activity